

## **FLUJO TRANSITORIO EN SUELOS LIMO ARENOSOS: APLICACIÓN DEL CÓDIGO HYDRUS 2D/3D**

Lexow, Claudio

PAID – Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC). Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur, San Juan 670, B8000ICN, Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina. e-mail: lexow@uns.edu.ar

### **Resumen**

Se analiza el movimiento del agua en un suelo limo arenoso mediante la aplicación del código HYDRUS 2D/3D y se compara con medidas experimentales. HYDRUS 2D/3D es un modelo de elementos finitos que resuelve numéricamente, en dos dimensiones, las ecuaciones para el flujo de agua y las ecuaciones de para el transporte de calor y solutos en el medio no saturado - saturado. Se construyó un dominio geométrico rectangular cuyos límites laterales son nodos con ausencia de flujo y la superficie inferior es de carga variable debido a la presencia de la capa freática fluctuante que en términos medios se ha situado entre los 2,60 m de profundidad y los 2,00 m de profundidad, con picos de ascenso puntuales que han alcanzado 1,50 m de profundidad. Se definieron cuatro horizontes cuyas propiedades físicas y químicas se asumen uniformes dentro de cada uno. Se pudo determinar que en las capas superiores se reprodujo con un mejor grado de ajuste la variabilidad temporal de las condiciones de humedad, a 30 cm se determinó un coeficiente de correlación múltiple  $r = 0,81$ , pero no así con la tensiometría. La incorporación de las oscilaciones del nivel freático en la simulación permitió reproducir con un valor aceptable de ajuste ( $r = 0,81$ ) respecto las valoraciones de humedad y de tensión matricial medidas en las capas inferiores. Los resultados de la simulación muestran un muy buen ajuste con los valores medidos tanto de humedad como de tensión matricial dentro del período considerado y en este marco hidrogeológico.

**Palabras claves:** zona no saturada, nivel freático, simulación.

### **Abstract**

The HYDRUS 2D/3D code was used to study water movement in a sandy loam soil and was compared with experimental measurements. HYDRUS 2D/3D is a software package for simulating two dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably saturated media. A rectangular domain was defined with zero flux at the vertical sides and variable head conditions on the lower limit due the fluctuating water table situated in depth 2,60 to 2,00 m with eventually ascents until 1,50 m. Four horizons were defined with uniform physical and chemical properties in each one. On the upper layers moisture conditions multiple correlation coefficient showed better adjustment ( $r = 0,81$ ) but not with tensiometry. Simulations moisture and tensiometry results considering oscillating water table in the simulation were good enough for deep layers measurements ( $r = 0,81$ ) as well as tensiometry. The simulations results showed a very good agreement between measured and simulated soil water contents and tensiometry in the period considered under this hydrogeology framework.

**Keywords:** unsaturated zone, water table, simulation.

## INTRODUCCIÓN

Conocer de que manera se desarrolla el flujo de agua en la zona no saturada (ZNS) es de suma importancia con vistas a su aplicación en diversos casos prácticos: evaluación de métodos de riego, cálculos de recarga, contaminación y descontaminación de suelos, etc. En este sentido la implementación de modelos matemáticos de simulación genera amplias expectativas en alcanzar dichos objetivos, sin bien aún se plantean ciertas dificultades para reproducir determinados procesos que tienen lugar en el medio no saturado.

El objetivo de este trabajo es evaluar el comportamiento hidrodinámico en un suelo limo arenoso mediante la modelación numérica empleando el programa HYDRUS 2D/3D (Simunek et al., 2006). En esta etapa se ha incorporado en la simulación, a diferencia del trabajo anterior (Lexow, 2010), como límite inferior a la capa freática de posición variable de acuerdo a los registros freatimétricos del período en cuestión. El desarrollo experimental intenta alcanzar conclusiones aplicables en este tipo de ambientes que puedan ser referenciados con experiencias similares tales como las de Rubio et al. (2005), Arbat et al. (2007), Jiménez et al. (2007), Ajdary (2008), y Kandelous y Simunek (2010), entre otras.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Registros hidrométricos

Los datos hidrométricos originales corresponden a un período de cuatro años procedentes de una parcela experimental donde predomina un suelo limo arenoso (Lexow, 2010). El potencial hidráulico de la zona no saturada (ZNS) se determinó a partir de lecturas tensiométricas cada 30 cm de profundidad (desde 30 a 1,80 m); en cada una de esas posiciones se obtuvieron las valoraciones de humedad volumétrica por medio de una sonda de neutrones. Las precipitaciones diarias obtenidas a partir de una estación meteorológica constituyen el ingreso de agua al sistema; la freatimetría de registro continuo provino de un piezómetro digital instalado en la misma parcela (Figura 1). La salida de agua a la atmósfera, evapotranspiración real, se obtiene a partir de la evapotranspiración potencial mensual (ETP) de referencia estimada según Penman-Monteith (FAO, 1993).

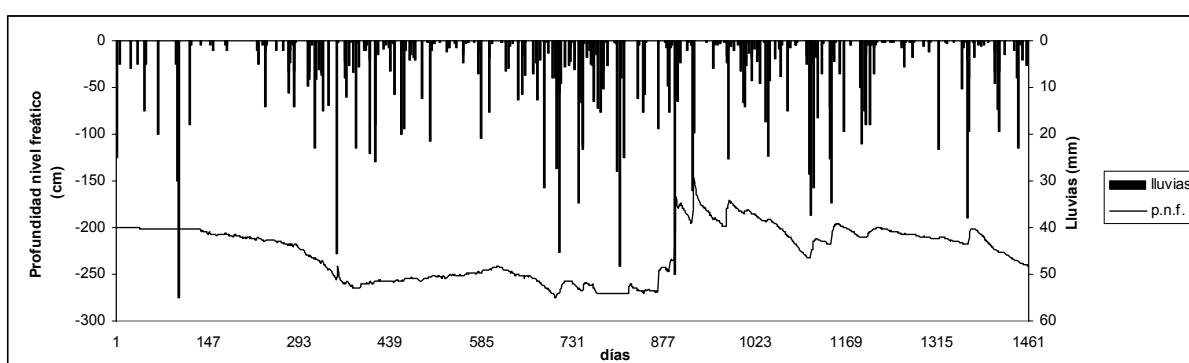


Figura 1. Precipitaciones y profundidad del nivel freático del período

### Propiedades hidráulicas

La ZNS fue diferenciada texturalmente en 4 horizontes: limo arenoso de 0 a 47 cm, limo arcillo arenoso de 47 a 78 cm, limo areno arcilloso de 78 a 160 cm y arena limosa de 160 cm en más. Los parámetros hidráulicos de cada capa (Lexow, 2010), ajustados mediante el código RECT (van Genuchten et al., 1991), consisten en: la humedad residual  $\theta_r$ , la humedad en saturación  $\theta_s$ ,  $\alpha$  y  $n$  que son parámetros empíricos condicionantes de la forma de la curva de retención y  $K_s$  la permeabilidad saturada (Tabla 1).

Tabla 1. Parámetros hidráulicos

Capa	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	n	$K_s$ (cm/d)
1	0,038	0,52	0,026	1,44	38,2
2	0,063	0,48	0,021	1,32	13,2
3	0,090	0,48	0,008	1,52	11,1
4	0,048	0,52	0,034	1,74	105,1

### Modelo de simulación HYDRUS 2D/3D

El flujo de agua en la ZNS se simuló mediante la aplicación del código HYDRUS 2D/3D (Simunek et al., 2006) que es ejecutable en ambiente Windows. Es un modelo de elementos finitos que resuelve numéricamente, en dos dimensiones, las ecuaciones de Richards para el flujo de agua en el medio no saturado - saturado y las ecuaciones de Fick (advección – dispersión) para el transporte de calor y solutos. La ecuación de flujo incluye un término sumidero que hace referencia a la extracción de agua por parte de las raíces de las plantas. Para la aplicación del método de elementos finitos para resolver las ecuaciones de flujo y transporte se emplea el método Galerkin a partir de las condiciones iniciales y de contorno definidas por el usuario.

La representación del medio físico resultó en un dominio geométrico rectangular de 400 cm de ancho y de 260 cm de altura conformado de una malla de elementos finitos de 203 nodos y 360 elementos triangulares. Dentro de los cuatro horizontes diferenciados se asumen propiedades físicas y químicas uniformes.

El tiempo total de simulación fue de 1461 días cuya discretización consistió en: paso de tiempo inicial de 0,0001 (día), paso mínimo  $1e^{-005}$  (día) y máximo 1 (día) (brindados por defecto por el programa). Las condiciones iniciales de la simulación consistieron en un perfil homogéneo de tensión matricial de -100 cm.

Las funciones hidráulicas del suelo fueron estimadas según el modelo de van Genuchten-Mualem (van Genuchten, 1980) sin considerar el fenómeno de histéresis:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + |\alpha h|^n\right]^m} \quad (1)$$

Donde  $\theta(h)$  es la humedad volumétrica en función de la tensión matricial (para  $h < 0$ ) y  $m = 1 - 1/n$ . Para la condición  $h \geq 0$ ,  $\theta(h) = \theta_s$ , mientras que la permeabilidad es estimada en función del contenido efectivo de humedad ( $S_e$ ):

$$K(S_e) = K_s S_e^l \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m\right]^2 \quad (2)$$

Donde  $l = 0,5$ , es la conectividad de poros (Simunek et al., 2006) y

$$S_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3)$$

Dado que el modelo hidráulico seleccionado no contempla la macroporosidad se asume que puedan presentarse algunas diferencias entre las valoraciones medidas y estimadas de humedad del suelo y de tensiometría dada la importancia del flujo por preferencial en el sitio de estudio (Lexow, 2009).

El límite superior del modelo, superficie del suelo, se consideró dependiente de las condiciones atmosféricas, variable en el tiempo, dominado por las precipitaciones medidas y

la evapotranspiración real calculada por el programa en función de la ETP. Además, se estableció la existencia de vegetación herbácea con una profundidad máxima de raíz de 30 cm, a partir de las observaciones de campo, y para el cálculo de la extracción de agua, término sumidero, se aplicó el modelo de Feddes et al. (1978, en Simunek et al., 2006) que es una de las opciones que proporciona el mismo programa. Los límites laterales son nodos con ausencia de flujo, mientras que la superficie inferior ( $z = 0$ ) se estableció como un límite de carga variable dada la presencia de la capa freática. Este último presenta fluctuaciones en el tiempo del orden entre los 2,60 m y los 2,00 m de profundidad, con picos de ascenso puntuales que alcanzaron hasta 1,50 m de profundidad (Figura 1).

## **RESULTADOS**

### **Simulación con el modelo y comparación con las medidas de campo**

En el presente trabajo se consideraron para la evaluación y análisis aquellas situaciones hidrodinámicas más relevantes que hubieran determinado condiciones de flujo gravimétrico o mátrico comprobadas tales como: períodos secos y húmedos e impacto de lluvias intensas. Fueron tenidos en cuenta los valores de humedad y tensión matricial medidos y simulados a 30, 90 y 150 cm de profundidad. Los más superficiales por ser aquellos con mayor variabilidad temporal, generalmente indicadores de eventos hidrodinámicos intensos (lluvias, evapotranspiración) muchas veces amortiguados a mayores profundidades; los más profundos por encontrarse en un ambiente próximo a la capa freática, influenciado fuertemente por la franja capilar aunque sin llegar a estar totalmente inmerso en la zona saturada durante los eventos de ascenso del nivel freático.

### **Humedad volumétrica**

Dentro del marco considerado, HYDRUS 2D/3D representa el contenido de humedad de la ZNS con respecto a los valores medidos (Figura 2) con una relativa concordancia tanto en los períodos húmedos como secos. Las mayores discrepancias observables se presentan en el nivel superior (30 cm) aunque las tendencias de desecamiento y humectación son bien manifiestas. Esta situación es similar a la observada en el trabajo anterior (Lexow, 2010) donde no fue considerada la variación del nivel freático. Se observa en toda la serie una subestimación del modelo frente a condiciones de humedad elevada medida en el suelo y una sobreestimación cuando el contenido de humedad medido es menor. La diferencia de los valores subestimados con respecto a los medidos es en promedio de  $0,06 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  mientras que el promedio de la diferencia de los sobreestimados es de  $0,04 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ .

La inclusión del nivel freático variable en el modelo ha sido gravitante en la simulación de los valores de los niveles más profundos. Como se observa en la Figura 2 a medida que crece la profundidad el contenido medio de agua en cada nivel aumenta conforme se encuentra más próximo el nivel freático. Las variaciones en el contenido medio de humedad son menos acusadas y el tenor se mantiene con mayor duración en el tiempo. Además, y como ya fuera mencionado (Lexow, 2009) ante las distintas manifestaciones pluviométricas de cierta relevancia, el perfil de humedad prácticamente no presenta significativos retrasos en sus incrementos relativos debido a la manifestación de flujo preferencial.

Las observaciones gráficas conciben con las determinaciones estadísticas que presentan elevados coeficientes de correlación múltiple y de determinación (Tabla 2). Los mejores ajustes se logran en la medida que la humedad del suelo es mayor mientras que cuando el espacio poroso en juego, es decir con posibilidad para vaciarse o llenarse, es mayor, los errores aumentan probablemente debido a la falta de consideración del efecto de histéresis y de la participación del flujo por macroporos.

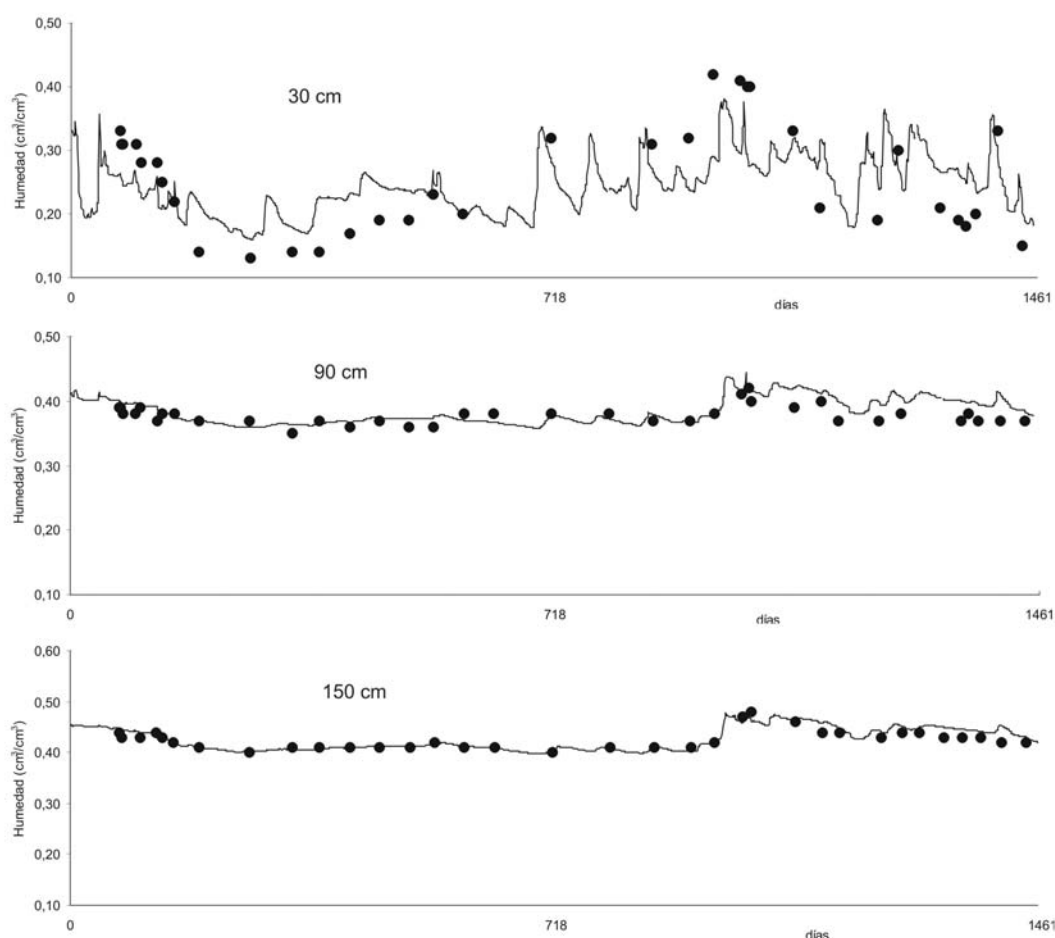


Figura 2. Comparación entre valores de humedad volumétrica medidos (puntos) y simulados (línea) a diferentes profundidades.

Se debe destacar que tales apreciaciones se realizan mediante un modelo cuyas escalas volumétrica y temporal no son precisamente de detalle, a diferencia de las experiencias conducidas por Arbat et al. (2007) y Kandelous y Simunek (2010) respectivamente.

Tabla 2. Estadísticos de comparación entre valores medidos y simulados de humedad.

Profundidad (cm)	Error típico	r	r <sup>2</sup>
30	0,005	0,81	0,66
90	0,009	0,81	0,65
150	0,007	0,91	0,84

## Tensión matricial

En la Figura 3 se presentan los valores medidos y simulados de la tensión matricial en las tres profundidades consideradas. Es evidente la falta de correlato en la simulación de los valores de tensión en el nivel más somero, igual cuando se consideró la capa freática estable (Lexow, 2010). A los 90 cm, la visualización de la gráfica expresa un mayor ajuste en la tendencia general aún con una leve sobreestimación que se mantuvo en, prácticamente, toda la serie. Podría deberse en principio a que la tensión matricial es una medida mucho más sensible y variable en el corto tiempo que la de humedad volumétrica, pues con rapidez revela los diferentes estados energéticos de la humedad del suelo aún cuando ésta última no haya variado significativamente, situación explicada por el fenómeno de histéresis. Caso contrario ocurre a los 150 cm de profundidad. En ambos casos, dados

los estadísticos logrados (Tabla 3), se supone una muy buena aproximación de la simulación lograda con HYDRUS 2D/3D pues mantiene la relación de estado energético de los potenciales hidráulicos que conllevan a la condición de movimiento del agua en la ZNS, hecho que es coincidente con lo relevado en campo.

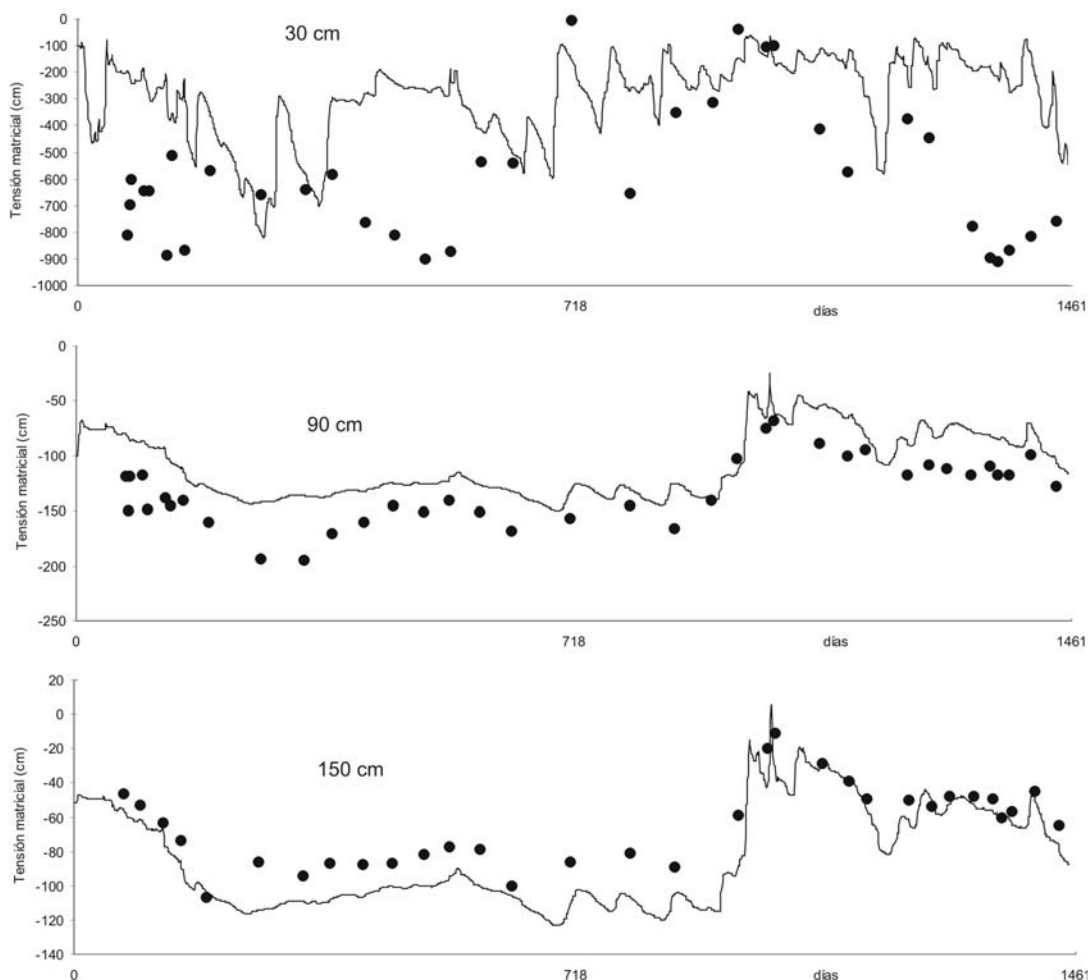


Figura 3. Comparación entre valores de tensión matricial medidos (puntos) y simulados (línea) a diferentes profundidades.

El coeficiente de correlación múltiple y el de determinación obtenidos para las profundidades de 90 y 150 cm (Tabla 3) denotan un grado de ajuste alto, muy superior al alcanzado con la consideración de nivel freático estable.

Tabla 3. Estadísticos de comparación entre valores medidos y simulados de tensión matricial.

Profundidad (cm)	Error típico	r	r <sup>2</sup>
30	253	0,18	0,03
90	15,3	0,86	0,74
150	8	0,94	0,88

### Hidrodinámica no saturada

La incorporación del nivel freático (nf) variable como límite inferior en el modelo produjo, como ya se mencionó, resultados satisfactorios en cuanto a la reproducción de las condiciones de campo medidas. A fin de analizar los alcances con respecto a la hidrodinámica se pueden tomar, por ejemplo, dos situaciones extremas que tuvieron lugar dentro de período de observación: día 385 (nf = 2,60m) y día 935 (nf = 1,50 m) (ver Figura

1). Para el día 385 (Figura 7) HYDRUS 2D/3D reproduce la profundidad del nivel freático a 2,60 m y una franja capilar de alrededor de 20 cm de espesor; el flujo de agua en la ZNS es ascendente en todo el perfil, o sea de dominio mátrico (Lexow, 2009). Esta condición es consonante con el momento de mayor evapotranspiración (Diciembre-Enero) e indica a su vez la influencia directa que tienen las condiciones atmosféricas sobre una capa freática somera.

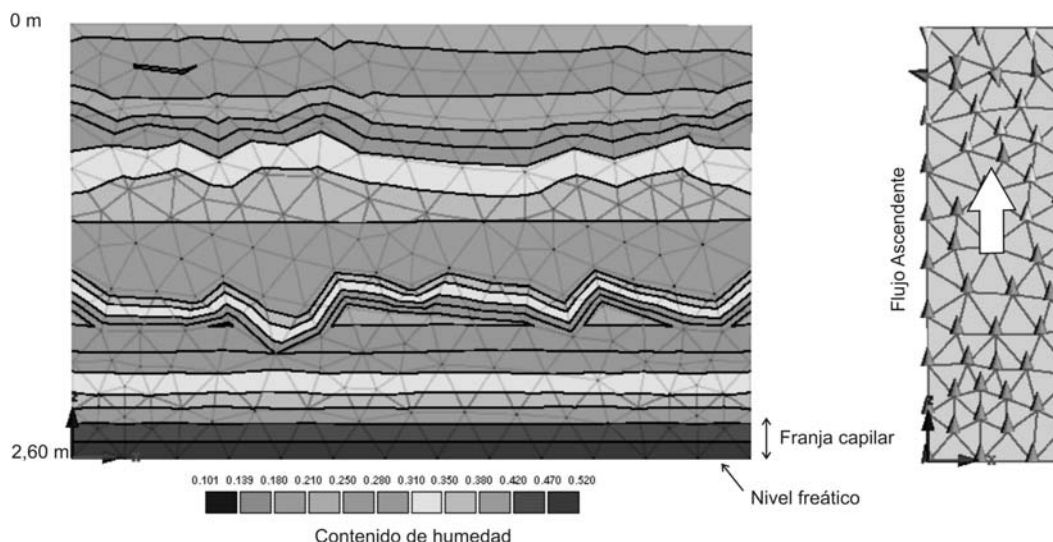


Figura 7. Perfil de humedad y sentido de flujo para el día 385 de la simulación.

Para el día 935 (Figura 8) HYDRUS 2D/3D reproduce la profundidad del nivel freático a 1,50 m y una franja capilar de alrededor de 60 cm de espesor; el flujo de agua en la ZNS es descendente en todo el perfil, o sea de dominio gravimétrico (Lexow, 2009). La franja capilar, que se moviliza masivamente junto a las fluctuaciones del nivel freático es representada fehacientemente tal lo descrito anteriormente por Lexow y Bonorino (2005). La condición del estado de humedad de la ZNS próxima a capacidad de campo y el perfil con flujo vertical descendente se corresponde con los eventos de máxima pluviometría. En dicho momento la evapotranspiración es mínima (Julio) lo que provoca una recuperación de los niveles freáticos del sector.

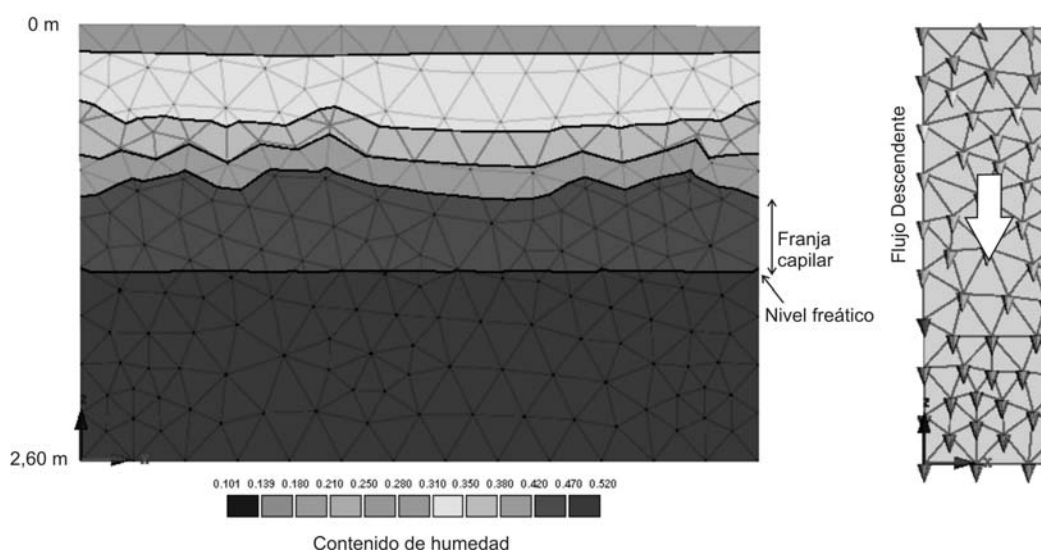


Figura 8. Perfil de humedad y sentido de flujo para el día 935 de la simulación.

## CONCLUSIONES

La evaluación del comportamiento hidrodinámico en un suelo limoarenoso mediante el código HYDRUS 2D/3D ha resultado muy positiva. El alcance logrado en la reproducción de diversos eventos hidrodinámicos en la zona no saturada, con un marco hidrogeológico de condiciones variables en el tiempo y de alto impacto (precipitaciones, evapotranspiración, nivel freático) ha sido muy alto y ha proporcionado resultados muy favorables que brindarán un mayor entendimiento de los procesos que ocurren en la misma.

Algunas diferencias observadas en la simulación del contenido de humedad en el suelo, sobre todo a menores profundidades, fortalecen la idea de considerar además el flujo preferencial (macroporos e interagregados) en próximas simulaciones.

El programa representa una muy buena alternativa como estudio preliminar a la realización de ensayos de campo en este tipo de suelos, bajo diversas condiciones hidrológicas y con objetivos de aplicación variado: riego, movimiento de solutos, evaluación de la vulnerabilidad, entre otros.

## REFERENCIAS

- Ajdary, K., 2008. Application of HYDRUS-2D for Simulation of Water Distribution in Different Types of Soils. *International Meeting on Soil Fertility Land Management and Agroclimatology*, Turkey, 253-261.
- Arbat, G., Puig-Bargués, J., Duran-Ros, M., Barragán, J. y Ramírez de Cartagena, F., 2007. Distribución del agua en el suelo en riego por superficie: Aplicación del código HYDRUS. *Estudios en la Zona No Saturada*. J.V. Giráldez Cervera y F.J. Jiménez Hornero (Ed.), VIII:305-311.
- FAO, 1993. CropWat. *Riego y Drenaje* Nro. 46. 215 p.
- Jiménez, J., Skaggs, T.H., van Genuchten, M. Th. y Candela, L., 2007. Estimación de la recarga por retorno de riego a partir de datos experimentales. Análisis de campo, laboratorio y modelación. *Estudios en la Zona No Saturada*. J.V. Giráldez Cervera y F.J. Jiménez Hornero (Ed.), VIII:101-105.
- Kandelous, M.M. y Simunek, J., 2010. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. *Agricultural Water Management*, 97:1070-1076.
- Lexow, C. y Bonorino, A.G., 2005. Hidrodinámica de la franja capilar de un acuífero loésico. IV Congreso Argentino de Hidrogeología y II Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de hidrología subterránea. (2): 55-64. ISBN 950-665-347-X.
- Lexow, C., 2009. Variaciones estacionales en la dirección del flujo matricial en la zona no saturada. *Aportes de la Hidrogeología al Conocimiento de los Recursos Hídricos*. (Eds. E. Mariño, C. Schulz) Buenos Aires: Asociación Civil Grupo Argentino de la Asociación Internacional de Hidrogeología. Santa Rosa: Amerindia Nexa di Nápoli (2): 467-476. ISBN 978-987-1082-36-0.
- Lexow, C., 2010. Distribución del agua en un suelo Hapludol: manejo del código Hydrus 2D/3D en la modelación del flujo no saturado. *Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en zonas de llanuras* (Eds. M. Varni, I. Extraigas, L. Vives) Instituto de Hidrología de Llanuras Dr. E. Usunoff (1): 279-286. ISBN 978-987-543-392-2.
- Rubio, C., Llorens, P. y van Genuchten, M. Th., 2005. Modelización del flujo transitorio en suelos Franco-Limosos utilizando HYDRUS-1D. *Estudios en la Zona No Saturada*. F.J. Samper Calvette y A. Paz González (Ed.), VII:257-261.
- Simunek, J., Sejna, M. y van Genuchten, M. Th., 2006. The HYDRUS (2D/3D) software package for simulating the two- and three-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably saturated media. Version 1.0. PC Progress, Prague, Czech Republic.
- van Genuchten, M. Th., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal*, 44(3):892-898.
- van Genuchten, M.Th., Leij, F.J. y Yates, S.R., 1991. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. EPA/600/2-91/065. IAG-DW 12933934. 117 pp.